

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Institut dopravy**

**Metody měření vysokotlakých indikací pístových  
spalovacích motorů**

**Methods of Measurement of Internal Combusting  
Engines High-Pressure Indications**

**Student:**

**Machálek Jakub**

**Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Richtář**

**Ostrava 2013**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Institut dopravy

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jakub Machálek**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2301R003 Dopravní technika a technologie  
Téma: **Metody měření vysokotlakých indikací pístových spalovacích motorů**  
**Methods of Measurement of Internal Combustion Engines High-Pressure Indications**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Metodiky měření
4. Výpočet indikovaných veličin
5. Zhodnocení a doporučení
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

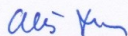
Matějka, R.: Vozidla silniční dopravy I. Bratislava: 1990. ISBN 80-05-00392-7  
Matějka, R.: Vozidla silniční dopravy II. Bratislava: 1990. ISBN 80-7100-074-4  
Vlk, F.: Zkoušení a diagnostika motorových vozidel. Brno: Vlk. 2001  
Vlk, F.: Motorová vozidla I, Brno: VUT Brno. 1989. ISBN 80-214-0038-2

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Richtář**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. 5. 2013

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Matej Jankov', written over a dotted line.

podpis studenta

**Prohlašuji, že**

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).

- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (ať do jejich skutečné výše).

- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. 5. 2013



podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Machálek Jakub

Adresa trvalého pobytu autora práce: Hornická 1430/22, 74801, Hlučín

**Poděkování:**

Na tomto místě bych rád poděkoval rodině, za podporu při studiu. Dále bych zde chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Richtářovi za cenné rady při tvorbě mé bakalářské práce. Velký dík patří Ing. Pavlu Dreslerovi za odborné konzultace a věcné připomínky k mé bakalářské práci.

# **Anotace bakalářské práce**

Název práce: Metody měření vysokotlakých indikací pístových spalovacích motorů, 42s.

Autor: Jakub Machálek

Katedra: 342 – Institut dopravy

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Richtář, Institut dopravy Strojní fakulty VŠB – Technické univerzity v Ostravě

Bakalářská práce se zabývá problematikou měření vysokých tlaků ve spalovacím prostoru motoru a jejich vyhodnocováním. V obecné části popisuje pístový spalovací motor a jeho funkci, dále popisuje metody měření vysokotlakých indikací a používané snímače. V praktické části se věnuje vyhodnocování naměřených hodnot a výpočtu indikovaných veličin pomocí vytvořené šablony. Závěr práce hodnotí získané výsledky a postupy. Součástí bakalářské práce je příloha šablony pro výpočet indikovaných veličin.

## **Klíčová slova:**

Vysokotlaké indikace, spalovací motor, indikovaný výkon, střední indikovaný tlak, měření výkonu



# **Annotation of bachelor thesis**

Title: Methods of measurement of Internal Combusting Engines High-Pressure Indications, 42p.

Author: Jakub Machálek

Department: 342 – Institute of transport

Supervisor: Ing. Michal Richtář, Institute of transport, Faculty of Mechanical Engineering  
VŠB - Technical University of Ostrava

This thesis deals with the measurement of high pressure in the combustion chamber of the engine and their analysis. In the first part is described the reciprocating internal combustion engine and its functionality, and describes methods for measuring high-pressure indication and common sensors. The next part is devoted to the evaluation of the measured values and calculated values indicated using created template. Finally, the thesis evaluates the results and procedures. The work is attachment template to calculate the indicated quantities.

## **Key words:**

High-Pressure indications, internal combustion engine, indicated power, indicated mean pressure, power measurement

<b>SEZNAM POUŽITÝCH VÝRAZŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>9</b>
<b>1.ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>2. ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU .....</b>	<b>11</b>
2.1. SPALOVACÍ MOTOR A JEHO DĚLENÍ.....	11
2.2. POPIS FUNKCE ZÁŽEHOVÉHO ČTYŘDOBÉHO MOTORU .....	15
2.3. ZÁKLADNÍ POJMY A PARAMETRY PÍSTOVÉHO SPALOVACÍHO MOTORU.....	16
2.4 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY MOTORU .....	20
2.5 ZKOUŠENÍ MOTORŮ A MĚŘENÍ PROVOZNÍCH VELIČIN .....	22
<b>3. METODIKY MĚŘENÍ .....</b>	<b>23</b>
3.1. VYSOKOTLAKÉ A NÍZKOTLAKÉ INDIKACE .....	23
3.2. ZAŘÍZENÍ NA MĚŘENÍ VYSOKOTLAKÝCH INDIKACÍ A JEJICH SNÍMAČE .....	24
3.2.1 PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE TLAKU .....	24
3.2.2 PIEZOELEKTRICKÝ JEV .....	24
3.2.3. KONSTRUKCE PIEZOELEKTRICKÉHO SNÍMAČE TLAKU .....	26
3.2.4. VLASTNOSTI A CHARAKTERISTIKY PIEZOELEKTRICKÉHO SENZORU .....	27
3.3. POPIS MĚŘENÍ VYSOKOTLAKÉ INDIKACE .....	28
3.4. P-A DIAGRAM A P-V DIAGRAM .....	30
<b>4. VÝPOČET INDIKOVANÝCH VELIČIN .....</b>	<b>31</b>
4.1. OKAMŽITÝ OBJEM – KINEMATIKA KLIKOVÉHO MECHANISMU .....	31
4.2. KOREKCE TLAKU, VÝPOČET INDIKOVANÉ PRÁCE A STŘEDNÍHO INDIKOVANÉHO TLAKU (IMEP).....	34
4.3. VÝPOČET INDIKOVANÉHO VÝKONU.....	37
4.4. EFEKTIVNÍ UKAZATELE .....	37
4.5. ZTRÁTOVÉ UKAZATELE .....	37
<b>5. ZHODNOCENÍ A DOPORUČENÍ.....</b>	<b>38</b>
<b>6.ZÁVĚR .....</b>	<b>39</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>40</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>41</b>



## SEZNAM POUŽITÝCH VÝRAZŮ A ZKRATEK

- OHV** (Over Head Valve) – ventilový rozvod s vačkovým hřídelem v hlavě válce
- OHC** (Over Head Camshaft) – ventilový rozvod s vačkovým hřídelem v hlavě válce
- DOHC** (Double OHC) - ventilový rozvod s dvěma vačkovými hřídeli v hlavě válce
- SV** (Side Valve) – ventilový rozvod s ventilem na straně válce
- HÚ** (Horní úvrat') – horní úvrat' pístu spalovacího motoru
- DÚ** (Dolní úvrat') – dolní úvrat' pístu spalovacího motoru
- IMEP** (indicated mean pressure) – střední indikovaný tlak
- BMEP** (braked mean pressure) – střední efektivní tlak
- FMEP** (fiction mean pressure) – třecí střední efektivní tlak
- MPI** (Multi Point Injection) – vícebodové vstřikování
- LPG** (Liquefied Petroleum Gas) – zkapalněný ropný plyn
- CNG** (Compressed Natural gas) – stlačený zemní plyn
- EURO 4** – emisní norma evropské unie

## 1.ÚVOD

V bakalářské práci se zabývám měřením vysokotlakých indikací spalovacích motorů. V dnešní moderní době jsou na spalovací motory kladeny stále větší nároky a to jak plnění stále přísnějších emisních norem, tak snaha o dosažení co největšího efektivního výkonu a co nejnížší spotřeby paliva. K tomu je potřeba znát děje probíhající uvnitř spalovacího prostoru. Tyto děje popisuje tzv. indikátorový diagram. Vzhledem k tomu, že neexistuje žádný obecný vztah, který by stanovoval průběh hoření jen z příslušných provozních a konstrukčních parametrů motorů, je stále zapotřebí testování spalovacích motorů formou měření výkonu na výkonové brzdě a měření vysokotlakých, případně nízkotlakých indikací.

Již v době provozování parních strojů byl indikátorový diagram důležitou diagnostickou pomůckou k seřizování motorů a zvyšování jejich výsledné účinnosti. Jednalo se tehdy o mechanické zapisovače s mechanickým přenosem měřených dat (tlaku ve spalovacím prostoru a okamžité polohy pístu). V dnešní době využívá tohoto, dnes již moderního přístroje na měření vysokotlakých indikací, většina automobilek a firem vyvíjejících spalovací motory.

Cílem mé bakalářské práce je vytvoření metodiky vyhodnocování dat naměřené vysokotlaké indikace čtyřdobého, pístového spalovacího motoru včetně vyhodnocení výsledků a následného porovnání hodnot naměřených na motorové brzdě s hodnotami indikovaných veličin.

## **2. ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU**

### **2.1. SPALOVACÍ MOTOR A JEHO DĚLENÍ**

Spalovací motor je mechanický tepelný stroj, který je schopen přeměnit chemickou energii dodanou v palivu na energii tepelnou (tepelné ztráty) a mechanickou (působením tlakové síly na dno pístu). Posunující síla na dno pístu se dále převádí klikovým mechanismem na pohyb rotační. [1]

Během let vývoje vznikaly různé druhy pístových spalovacích motorů s různou účinnostmi a to jak s písty zdvihovými, tak s písty rotačními.

#### **Hlavní dělení pístových spalovacích motorů podle:**

1. Druhu paliva
2. Způsobu tvoření hořlavé směsi
3. Způsobu výměny náplně válců
4. Způsobu zapalování směsi
5. Konstruktivního provedení
6. Účelu a použití motoru

#### **1. Dle druhu paliva**

Podle druhu paliva se motory dělí na dvě hlavní skupiny a to na plynové motory a motory na kapalná paliva a ty se dále dělí na motory zážehové (spalující snadno odpařitelné paliva např. benzín) a motory vznětové (spalující nesnadno odpařitelné paliva např. motorová nafta)

a) Motory benzínové, které své uplatnění našly převážně k pohonu silničních vozidel, osobních a lehčích nákladních vozidel, jednostopých vozidel, menších letadel a dále své využití našly pro potřeby sportovní, hospodářské a další. [1,2,3]

b) Motory naftové, se používají k pohonu těžších nákladních automobilů, stavebních strojů, traktorů, v dnešní době také ve velké míře k pohonu osobních

automobilů a dalších. Jako naftové se vyrábějí také motory elektrárenské, lodní, strojní a motory průmyslové s velkým výkonostním rozsahem (tj. od 2 do 35000 kW). Vytvářejí se také velké lodní motory o výkonu až 60MW.

## **2. Podle způsobu tvoření hořlavé směsi**

Hořlavá směs paliva a vzduchu se tvoří buďto před pracovním válcem (vnější tvoření směsi) nebo uvnitř pracovního válce (vnitřní tvoření směsi).

a) Směs se vytvoří před pracovním válcem (především u zážehových motorů) ve směšovací zařízení (směšovač plyn-vzduch, karburátor) nebo přetlakem paliva (vstřikovače, vefukovací ventily v sacím/plnicím traktu). Vstřikovací a vefukovací zařízení je v dnešní době možno plynule a přesně regulovat s pomocí elektronických prvků. Vstřikovací zařízení může být buďto jednobodové (jeden vstřikovač pro všechny válce) nebo vícebodové (na každý válec jeden vstřikovač).

b) V pracovním válci spalovacího motoru se směs tvoří především u vznětových motorů na těžko odpařitelná kapalná paliva a to obvykle vstřikem regulované dávky paliva vysokotlakým čerpadlem. Rozsah bezeztrátové kvalitativní regulace při spalování heterogenní směsi, menší citlivost na přebytek vzduchu a vlastnosti paliva a odstranění úniku paliva do výfukového potrubí dnes vede k tomu, že se tento systém začíná využívat i u motorů zážehových a vede k jejich optimalizaci a zvýšení efektivnosti a účinnosti. [1,2,3]

## **3. Podle způsobu výměny náplně válců**

Výměna náplně se v podstatě děje dvojím způsobem.

a) U čtyřdobých motorů se před koncem expanzního zdvihu otevírají výfukové ventily, kterými přetlakem unikají spaliny z válce, zbytek spalin se vytlačuje pístem při výfukovém zdvihu. Při nasávacím zdvihu se do válce nasává čerstvá směs, nebo jen vzduch, který se při kompresním zdvihu stlačí.

b) U dvoudobých motorů se výfuk spalin děje na konci expanzního zdvihu a to po otevření výfukových kanálů nebo ventilů. Spaliny unikají nejprve vlastním přetlakem a

po dostatečném poklesu tlaku ve válci se otevřou plnicí otvory a zbytek spalin se vyplachuje čerstvou směsí nebo vzduchem, dodávaným s potřebným přetlakem plnicím dmychadlem. Přitom se válec naplní čerstvou směsí nebo vzduchem, jež se při kompresi stlačí jako u čtyřdobých motorů.

Krom toho je možno čtyřdobý i dvoudobý motor plnit čerstvou směsí (vzduchem) s přibližně atmosférickým případně nižším tlakem (atmosférické plnění, přirozené nasávání) nebo plnit s vyšším tlakem (přetlakem) přeplňování. [1,3]

#### **4. Dle způsobu zapalování směsi**

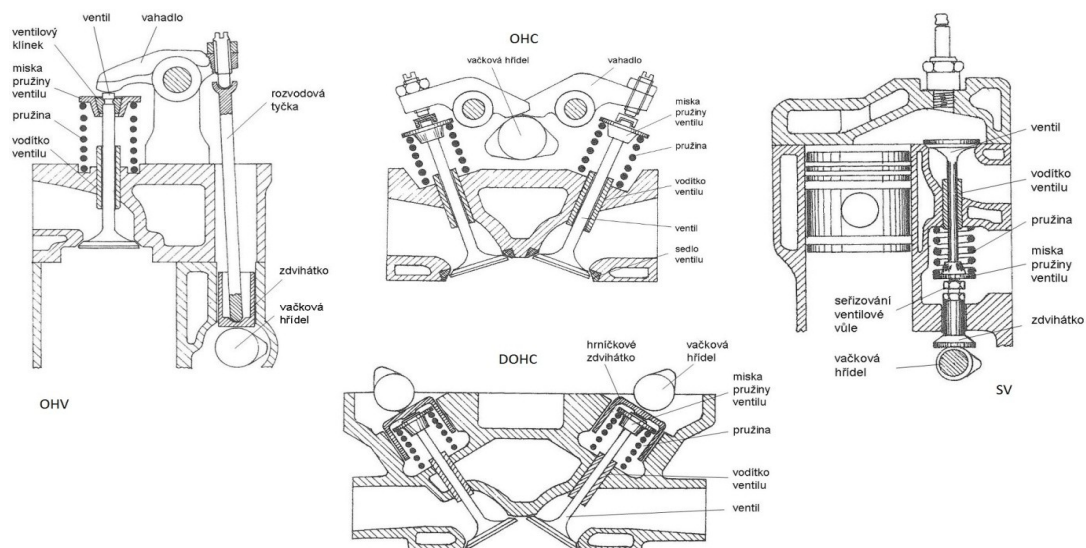
a) Umělým zažehnutím, v dnešní době zpravidla elektrickou jiskrou, toto je obvyklým způsobem zapalování předem připravené homogenní směsi paliva a vzduchu u motorů na lehká paliva (benzín) a plynná paliva (LPG, CNG). Směs je stlačována pouze pod teplotu samovznícení ( $\epsilon$  je max. 12), pokud se nejedná o motory s difúzním spalováním heterogenní směsi (např. motory FSI).

b) Samovolným vznícením vstřikovaného paliva do pracovního prostoru válce díky vysoké teplotě směsi nebo vzduchu po kompresi a to ve většině případů u motorů s vysokým stlačením náplně válce kdy ( $\epsilon$  je min. 12), především motory vznětové a různopalivové motory. [2,3]

#### **5. Dle konstrukčního provedení:**

- a) **Podle počtu zdvihů** připadajících na jeden pracovní oběh na 4dobé a 2dobé
- b) **Podle počtu pístů v jednom pracovním válci** na jednopístové a dvoupístové
- c) **Podle počtu pracovních ploch jednoho pístu** na jednočinné a dvoučinné
- d) **Podle pohybu pístu** na rotační a zdvihové
- e) **Podle způsobu chlazení** na kapalinou nebo vzduchem chlazené
- f) **Podle průměru pracovního válce** na malé ( $D < 150\text{mm}$ ), střední ( $150\text{mm} < D < 500\text{mm}$ ), velké ( $D > 500\text{mm}$ ).
- g) **Dle počtu válců na:**
  - a. Jednoválcové s jedním spalovacím prostorem
  - b. Dvou- i víceválcové, nejčastěji 3 až 12, ale dokonce i s 20ti válci

- c. Mnohoválcové se 24, 32 a ojediněle i více jak 48 válců
- h) Podle počtu a polohy klikového hřídele** na jedno-, dvou-, i vícehřídelové
- i) Podle polohy a uspořádání válců** (stojaté, ležaté, vidlicové, ležaté s protilehlými válci, atd.)
- j) Podle rychloběžnosti** vyjádřené zpravidla střední pístovou rychlostí  $C_s$  na:
  - a. Pomaloběžné s  $C_s < 7.5 \text{ m/s}$  při  $D < 160\text{mm}$  nebo s  $C_s < 6.5 \text{ m/s}$  při  $D > 160\text{mm}$
  - b. Rychloběžné s  $C_s > 7.5 \text{ m/s}$  resp.  $C_s > 6.5 \text{ m/s}$
- k) Podle způsobu plnění válců na:** nepřepřňované s přirozeným nasáváním vzduchu (směsi) a přepřňované např. turbodmychadlem nebo kompresorem
- l) Podle konstrukce rozvodu pracovní látky na:**
  - a. Ventilové
    - OHV – s visutými ventily a s rozvodovým hřídelem uloženým obvykle v klikové skříni
    - OHC – s visutými ventily a s rozvodovým hřídelem uloženým v hlavě válců nebo vedle ní
    - DOHC – se dvěma OHC na jeden válec
    - SV – se stojatými ventily umístěnými na jedné straně válce a rozvodovým hřídelem umístěným v klikové skříni
    - Desmodromické – používané u vysokootáčkových motorů (ventil nezavírá pružina, ale otevírá a zavírá vačkový hřídel)
  - b. Šoupátkové s různým provedením 4taktní motory, dnes již nepoužívané
  - c. Kanálové s jedním, dvěma nebo třemi systémy kanálů ovládané jedním nebo dvěma písty 2taktní motory
  - d. Se smíšeným rozvodem ventilovým OHV a kanálovým (viz. Obr.1.1)



Obr.1.1 – typy rozvodových mechanismů [17]

## 2.2. POPIS FUNKCE ZÁŽEHOVÉHO ČTYŘDOBÉHO MOTORU

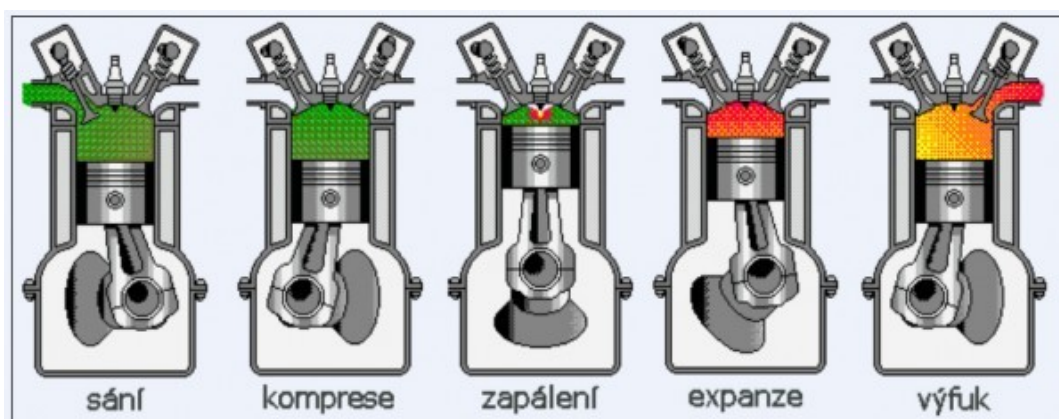
Princip funkce zážehového čtyřdobého motoru je popsán níže, prostřednictvím jednotlivých cyklů.

- **Sání** - Píst se pohybuje z HÚ do DÚ, čímž se v pracovním prostoru válce vytváří podtlak a čerstvá směs (vzduch) je nasávána do prostoru válce
- **Komprese** - Píst se pohybuje z DÚ do HÚ a sací i výfukový ventil je uzavřen. Tím dochází ke stlačování směsi, při kterém dochází také ke zvýšení tlaku a teploty ve válci. Díky toho se kapičky paliva a směsi odpařují a vytváří směs par se vzduchem.
- **Hoření a Expanze** – Zápalná směs je zažehnuta elektrickým výbojem ( jiskrou ) mezi elektrodami svíčky. Oba ventily jsou zavřeny. Po zažehnutí se čelo plamene se šíří rychlostí 30 – 50m/s. Z důvodu správného hoření směsi přeskakuje jiskra v závislosti na otáčkách motoru již 0° až 45° před HÚ. Je žádoucí aby byla dosažena co největší telená účinnost motoru, tudíž se směs zapaluje s předstihem před HÚ a proces hoření s intenzivním uvolňováním tepla probíhá v intervalu 10°-15° před HÚ a 15°-20° po HÚ. Teplota se pohybuje mezi 2000°C - 2500°C. Maximální spalovací tlaky mají hodnotu 5MPa - 6,5MPa . Větší část hoření končí cca 40° za HÚ. Píst se pohybuje z



HÚ do DÚ a tepelná energie směsi se mění na mechanickou práci. Expanze je jediná pracovní fáze cyklu.

- **Výfuk** – Před ukončením expanzního zdvihu se začíná otevírat výfukový ventil 30°-70° před DÚ a dochází k odstranění spalín z pracovního prostoru válce. V této chvíli je tlak ve válci mnohem větší než ve výfukovém potrubí a spaliny proto unikají vysokou rychlostí. Po průchodu pístu DÚ jsou spaliny vytlačovány pohybujícím se pístem z prostoru válce. [3]



Obr.1.2 – jednotlivé cykly spalovacího motoru [14]

### 2.3. ZÁKLADNÍ POJMY A PARAMETRY PÍSTOVÉHO SPALOVACÍHO MOTORU

- **Horní úvrať HÚ** „Horní úvrať HÚ je poloha pístu, ve které je píst nejvíce vzdálen od osy klikového hřídele.“ [2]
- **Dolní úvrať DÚ** „Dolní úvrať DÚ je poloha pístu, ve které je píst nejbližší osy klikového hřídele.“ [2]
- **Zdvih pístu Z [mm]** - je dráha pístu mezi HÚ a DÚ.
- **Vrtání válce D [mm]** - je jmenovitý průměr dutiny pracovního prostoru válce
- **Zdvihový objem válce  $V_{z1}$  [cm<sup>3</sup>]** - je jmenovitý objem prostoru ve válci motoru omezený horní (HÚ) a dolní úvratí (DÚ). Velikost jeho objemu se určí dle vzorce: [1]

$$V_{z1} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot z \text{ [cm}^3\text{]} \quad (1.1)$$

Kde: D - vrtání válce [cm]

z - zdvih pístu [cm]

- **Zdvihový objem motoru  $V_Z$  [cm<sup>3</sup>]** - je zdvihový objem všech válců motoru. Velikost jeho objemu se určí dle vzorce: [1]

$$V_Z = V_{z1} \cdot i_v \text{ [cm}^3\text{]} \quad (1.2)$$

Kde:  $i_v$  - počet válců

- **Zdvihový poměr  $\xi$**  – je poměr jmenovitých hodnot zdvihu pístu z a vrtání válce d. [1]

$$\xi = \frac{z}{D} [-] \quad (1.3)$$

U zážehových motorů bývá  $\xi = 0,6$  až  $1,1$  a u vznětových bývá  $\xi = 1,1 - 1,5$ .

- **Kompresní objem válce  $V_{\min}$  [cm<sup>3</sup>]** – jedná se o objem prostoru na spalovací straně pístu v HÚ. [1]
- **Celkový objem válce  $V_{\max}$  [cm<sup>3</sup>]** – Je celkový objem ve válci omezený pístem v DÚ včetně kompresního objemu. Je dán součtem zdvihového a kompresního objemu válce.

$$V_{MAX} = V_{MIN} + V_{Z1} \text{ [cm}^3\text{]} \quad (1.4)$$

- **Kompresní poměr  $\varepsilon$**  – je poměr celkového a kompresního objemu [1]

$$\varepsilon = \frac{V_{MAX}}{V_{MIN}} [-] \quad (1.5)$$

Výkon motoru a tepelná účinnost je závislá na kompresním poměru. Čím vyšší kompresní poměr, tím větší výkon a účinnost. U zážehových motorů se volí  $\varepsilon = 8 - 14$  u vznětových motorů volíme  $\varepsilon = 14 - 24$ .

- **Kompresní tlak  $p_k$  [Mpa]** - jedná se o tlak ve válci, který je vyvolán kompresním zdvihem, přičemž nedojde k zažehnutí či vznícení směsi.

Kompresní tlak je měřitelná veličina, podle které se posuzuje mechanický stav pístového spalovacího motoru.

- **IMEP - Střední indikovaný tlak  $p_i$  [Mpa]** - je to tlak vyvolaný spaliny, které působí na píst po celé jeho délce zdvihu.
- **Indikovaný výkon  $P_i$  [kW]** – je to poměr práce jednoho oběhu ( $W_i$ ) trvajícího čas  $t_1$ . Počet zdvihů  $\tau$  určuje daný čas  $t_1$ . Počítá se pro jeden pracovní oběh. [1]

motor čtyřdobý  $\tau = 4$

$$P_{i1} = P_i \cdot i_v = \frac{W_i}{t_1} \cdot i_v [\text{kW}] \quad (1.6)$$

$$P_{i1} = \frac{W_i \cdot n \cdot 2}{\tau} \cdot i_v = \frac{p_i \cdot V_z \cdot n \cdot 2}{\tau} \cdot i_v [\text{kW}] \quad (1.7)$$

Kde:  $P_i$  – indikovaný výkon motoru [kW]

$P_{i1}$  – indikovaný výkon jednoho válce [kW]

$V_{z1}$  – zdvihový objem jednoho válce [ $\text{m}^3$ ]

$n$  – otáčky motoru [ $\text{s}^{-1}$ ]

$i_v$  – počet válců [-]

- **Ztrátový výkon  $P_m$  [kW]** – jedná se o část indikovaného výkonu  $P_i$  [kW], který se spotřebuje při překonávání mechanických ztrát v motoru, včetně výkonu, který je potřeba k pohonu zařízení připojených pro měření efektivního výkonu. Ztrátový výkon  $P_m$  [kW] lze vyjádřit z rovnice (1.7) tak, že zavedeme střední tlak mechanických ztrát  $p_m$  [MPa] místo středního indikovaného tlaku  $p_i$  [MPa]. [1]

$$P_m = \frac{p_m \cdot V_z \cdot n \cdot 2}{\tau} \cdot i_v [\text{kW}] \quad (1.8)$$

- **BMEP - Střední efektivní tlak  $p_e$  [MPa]** - se určuje jako rozdíl indukovaného tlaku  $p_i$  [MPa] a středního tlaku mechanických ztrát  $p_m$  [MPa] [1]

$$p_e = p_i - p_m \text{ [MPa]} \quad (1.9)$$

- **Efektivní výkon motoru  $P_e$  [kW]** - jedná se o výkon, který lze naměřit na hnacím hřídeli motoru. Je závislý na ztrátovém výkonu  $P_m$  [kW]. [1]

$$P_e = P_i - P_m \text{ [kW]} \quad (1.10)$$

Pokud dosadíme (1.7), (1.8), (1.9), do rovnice (1.10) dostaneme vztah pro výpočet efektivního výkonu motoru  $P_e$  [kW]. [1]

$$P_e = \frac{p_e \cdot V_z \cdot n \cdot 2}{\tau} \cdot i_v \text{ [kW]} \quad (1.11)$$

Kde:  $p_e$  – střední efektivní tlak [MPa]

$V_z$  – zdvihový objem jednoho válce [ $\text{m}^3$ ]

$n$  – otáčky motoru [ $\text{s}^{-1}$ ]

$i_v$  – počet válců [-]

$\tau$  – taktnost motoru (počet zdvihů pístu za jeden pracovní oběh) [-]

- **Otáčky motoru  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ]** - vyjadřují počet otáček klikového hřídele za jednotku času
- **Největší dovolené otáčky  $n_{\max}$  [ $\text{min}^{-1}$ ]** - největší otáčky motoru povolené krátkodobě výrobcem
- **Točivý moment motoru  $M_m$  [Nm]** - jedná se o moment naměřený na výstupu motoru (na hnacím hřídeli). Efektivní výkon se pomocí točivého momentu  $M_m$  a otáček motoru  $n$  dá vypočítat v určitém provozním bodu motoru. [1]

$$P_e = M_m \cdot \omega = M_m \cdot 2\pi \cdot n \text{ [kW]} \quad (1.12)$$

Kde:  $n$  - otáčky motoru  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ]

$M_m$  - točivý moment motoru [Nm]

$\omega$  - úhlová rychlost [ $\text{rad.s}^{-1}$ ]

- **Efektivní měrná spotřeba paliva  $m_{pe}$  [ $\text{kg.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ]** - množství paliva, které spotřebuje motor za jednotku efektivního výkonu. [1]

$$m_{pe} = \frac{M_p}{P_m} [\text{kg.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}] \quad (1.13)$$

Kde:  $M_p$  - hodinová spotřeba [kg/h]

$P_m$  - výkon motoru [kW]

## 2.4 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY MOTORU

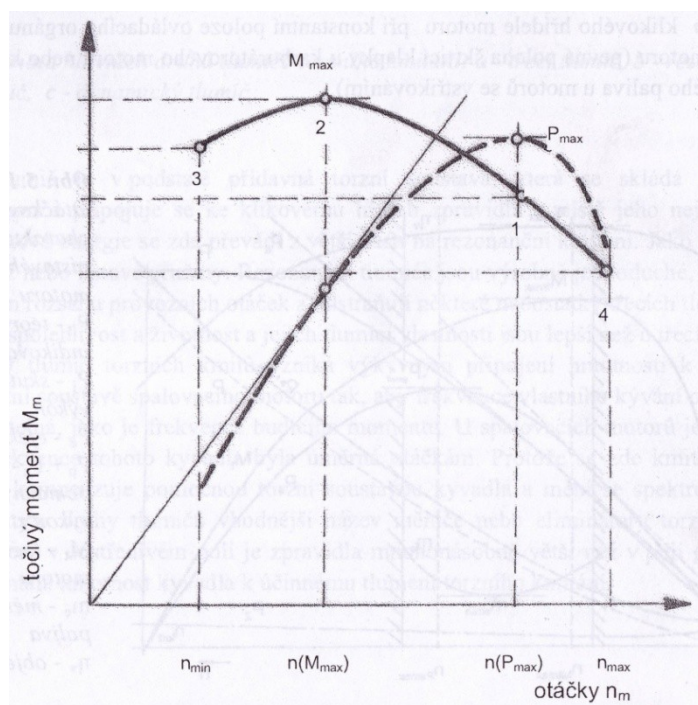
Charakteristikami pístového spalovacího motoru se nazývají grafická znázornění vzájemných závislostí vybraných provozních veličin motoru v soustavě pravoúhlých souřadnic.

Charakteristiky spalovacích motorů se ověřují konkrétním měřením motorů na zkušebních stolicích po výrobě, brzděním motoru. Mohou se rovněž vypočítat na základě známých dostupným parametrům (modelováním). Při zkouškách se sleduje chování motoru za chodu ve všech režimech zatíženého i nezatíženého motoru.

Rozlišujeme dvě základní charakteristiky a to otáčkovou (rychlostní) charakteristiku a zatěžovací charakteristiku.

1. **Otáčková charakteristika** – nezávislou proměnnou jsou otáčky klikového hřídele motoru  $n[\text{min}^{-1}]$ . Znázorňuje závislost točivého momentu motoru  $M_t$  a užitečného (efektivního) výkonu  $P_e$ , měrné spotřeby paliva  $m_{pe}$  a dalších parametrů na otáčkách  $n$  klikového hřídele motoru, při konstantní poloze ovládacího orgánu řízení

dodávky paliva do motoru (pevná poloha škrtící klapky u karburátorového motoru nebo konstantní dávka vstřikovaného paliva u motorů se vstřikováním). Viz Obr.1.3.

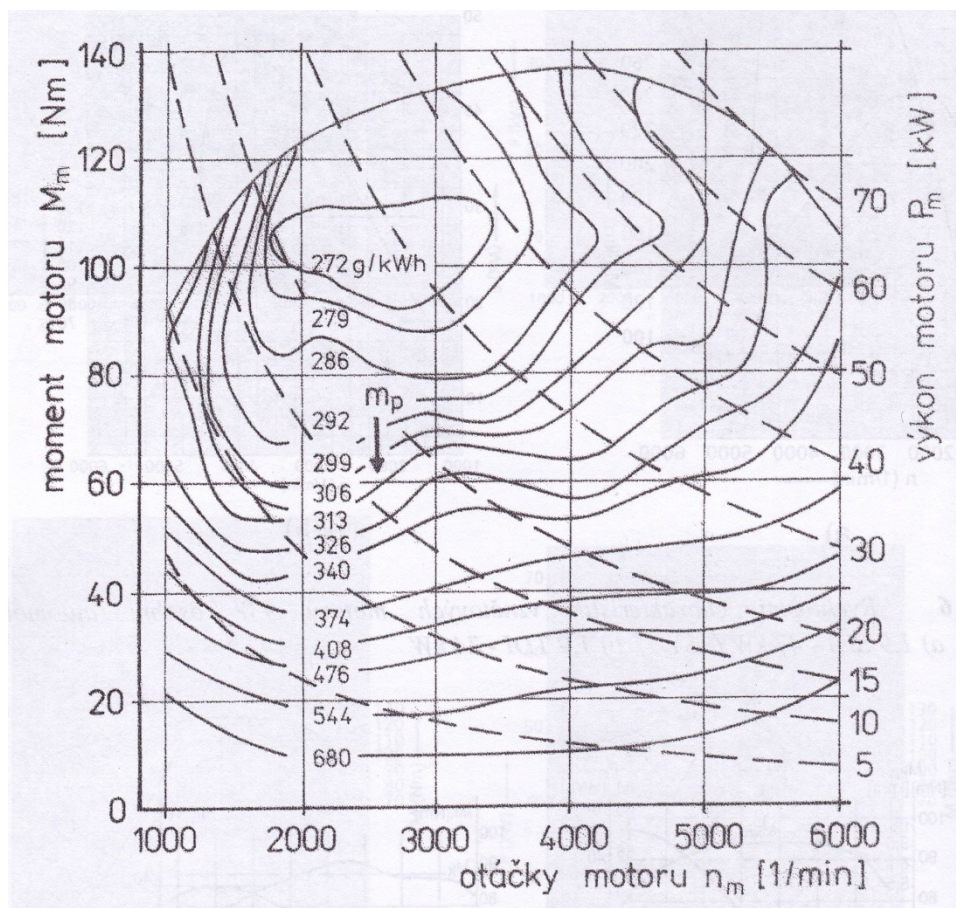


Obr.1.3 – vnější otáčková charakteristika [1]

**Vnější otáčková charakteristika motoru se určuje při nastavení ovládacího ústrojí motoru pro plné zatížení (100%)**

2. **Zatěžovací charakteristika** – je závislost vybraných parametrů motoru na jeho zatížení při konstantních otáčkách motoru. Nezávislou proměnnou může být točivý moment motoru  $M_t = M_m$  [Nm], střední efektivní tlak  $p_e$  [MPa], efektivní výkon motoru  $P_e = P_m$  [MPa] a sledovanými parametry mohou být: měrná efektivní spotřeba paliva  $m_{pe}$  [g.kWh<sup>-1</sup>], teplota výfukových plynů  $t_v$  [°C] a další. Soustava zatěžovacích charakteristik obsahuje víc charakteristik pro různé otáčky motoru. [1]

Celková (úplná) charakteristika se vynáší v pravoúhlé souřadné soustavě, kde na vodorovnou osu jsou nanášeny otáčky klikového hřídele motoru  $n$  [min<sup>-1</sup>] a na svislou osu zatížení určené buď točivým momentem  $M_k$  [Nm] nebo středním efektivním tlakem  $p_e$  [MPa]. Úplná charakteristika se nezjišťuje přímým měřením, ale vynáší se na základě měření vnější otáčkové charakteristiky a soustavy zatěžovacích charakteristik. [1]



Obr.1.4 – úplná charakteristika spalovacího motoru [1]

## 2.5 ZKOUŠENÍ MOTORŮ A MĚŘENÍ PROVOZNÍCH VELIČIN

Zkoušky spalovacích motorů lze rozdělit do dvou skupin a to buďto typové zkoušky, které se provádí v případě výroby nového motoru případně úpravě stávajícího motoru, nebo zkoušky provozní a to u motorů již uvedených do provozu. Z hlediska obsahu zkoušek je můžeme dělit na zkoušky za účelem měření škodlivých emisí ve výfuku motoru a zkoušky za účelem zjištění provozních veličin motoru, jako je momentová a výkonostní charakteristika a spotřeba paliva.

Výkon spalovacího motoru je možno měřit:

- **Přímým měřením výkonu** – z indikátorového diagramu nebo pohonem elektrického generátoru a měřením výkonu na svorkách.



- **Nepřímým měřením výkonu** – pomocí měření točivého momentu motoru a to buď mařením energie na mechanické, hydraulické nebo elektrické brzdě, nebo pohonem elektrického generátoru a měřením točivého momentu hřídele mezi motorem a generátorem torsními dynamometry, vířivými dynamometry nebo měřením reakčního momentu. [10][11]

Při přímém měření výkonu vycházíme z indikátorového diagramu, který vytvoříme pomocí naměřených hodnot vysokotlakých indikací. Ten následně porovnáváme s výkonem naměřeným na motorové brzdě.

### 3. METODIKY MĚŘENÍ

Základem pro vývoj a optimalizaci pístových spalovacích motorů je znalost dějů ve válci. Teprve měření a analýza průběhu tlaku ve válci poskytuje potřebná data k optimalizaci účinnosti, výkonu motoru, emisí a v neposlední řadě také životnosti motoru.

Průběh tlaku je reprezentativní ukazatel spalovacího procesu, a tím pádem také způsobu jak dochází k přeměně energie v motoru (chemické energie obsažené ve směsi paliva a vzduchu na mechanickou energii a teplo).

Z průběhu tlaku a změny objemu se následně určí celková mechanická práce pístu připadající na jeden pracovní cyklus. [13]

#### 3.1. VYSOKOTLAKÉ A NÍZKOTLAKÉ INDIKACE

Vysokotlaká a nízkotlaká indikace se stala v posledních letech vlivem vývoje měřicí techniky důležitým analytickým nástrojem využívaným k optimalizaci spalovacího procesu. Vývoj v oblasti měřicí ale také výpočetní techniky umožnil

dosažení potřebné technické vybavenosti, dostupnosti a zároveň také dostatečné přesnosti. [13]

**Vysokotlaká indikace** – je monitorování tlaku ve válci a analýza spalovacího procesu.

**Nízkotlaká indikace** – sledování a měření tlaku v sacím a výfukovém potrubí spalovacího motoru.

### **3.2. ZAŘÍZENÍ NA MĚŘENÍ VYSOKOTLAKÝCH INDIKACÍ A JEJICH SNÍMAČE**

V minulosti se vysoké spalovací tlaky měřily pomocí mechanických indikátorů kde se mechanicky pomocí pera nanášely hodnoty na osy x a y. Na osu x se vynášel pohyb pístu a na osu y tlak ve válce. V dnešní době se k měření vysokých tlaků ve spalovacím prostoru motoru používají piezoelektrické, piezorezistivní nebo optické senzory umístěné v hlavě spalovacího motoru v kombinaci se senzorem měřícím úhel natočení klikové hřídele (KH).

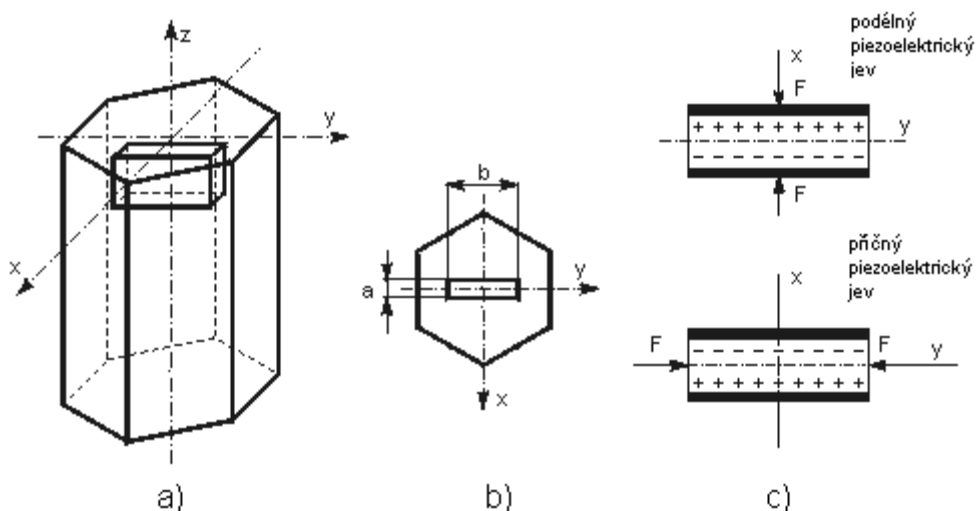
#### **3.2.1 PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE TLAKU**

Piezoelektrické snímače tlaku patří k nejrozšířenějším snímačům, používaných pro indikaci tlaku ve válci spalovacího motoru. Tento typ snímače byl použit i pro mě naměřené hodnoty.

#### **3.2.2 PIEZOELEKTRICKÝ JEV**

V roce 1880 zjistili vědci , bratři Pierre a Jacques Curierovi, že stlačováním krystalů turmalínu a později křemene, v určitých směrech, které nazvali elektrickými

osami, vzniká na koncích těchto os elektrický náboj opačného znaménka. Dále zjistili, že vzniklý povrchový náboj je přímo úměrný tlaku působícího na krystal. Název piezoelektrický jev byl odvozen z řeckého „piedzó“, což znamená tlačit. [12]



Obr.1.5 řez piezoelektrickým krystalem, příčný a podélný piezoelektrický jev [18]

Na obr.1.5 je schematická struktura krystalu křemene. Je-li takováto buňka namáhána silou s vektorem ve směru osy x, přestane se účinek nábojů vzájemně kompenzovat a na koncích elektrické osy vzniká přebytek elektrického náboje. Na povrchu krystalu se objeví volný náboj, tím pádem se objeví i na přiložených elektrodách. Výše popsaná skutečnost je principem přímého piezoelektrického jevu. Opačným jevem je nepřímý (obrácený) piezoelektrický jev, tzn. Že přiložením střídavého elektrického náboje se krystal rozkmitá. [12]

Piezoelektrickým elementem krystalu křemene je vyříznutá destička a to tak, že její hrany jsou rovnoběžné s jednotlivými osami krystalu (x – elektrická osa, y – mechanická osa, z – optická osa), takže působí-li síla kolmo na optickou osu, objeví se na osách kolmých k optické elektrický náboj. Působí-li na piezoelektrický element rovnoměrně rozložená síla  $F_x$  rovnoběžně s osou x, jedná se o tzv. podélný piezoelektrický jev a náboj Q, který vznikne na stěnách kolmých k ose x, je dán vztahem:

$$Q = K_p \cdot F_x \quad (1.14)$$

Kde:  $K_p$  piezoelektrická konstanta [ $C \cdot N^{-1}$ ]

$F_x$  síla působící rovnoběžně s osou x

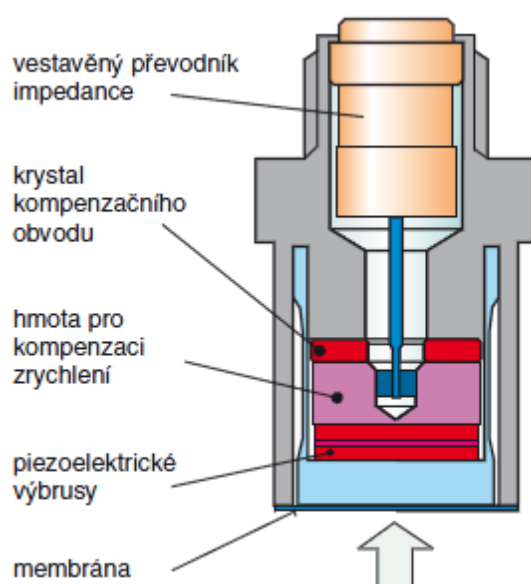
Působí-li na element síla  $F_y$  rovnoběžná s osou y, pak elektrické náboje, vznikající na plochách kolmých na elektrickou osu, jsou opačné. Jedná se o tzv. Příčný piezoelektrický jev a velikost náboje  $Q$  závisí na rozměrech krystalu a je dána vztahem:

$$Q = -K_p \cdot F_y \cdot \frac{b}{a} \quad (1.15)$$

Kde:  $a, b$  rozměry destičky [pm]

### 3.2.3. KONSTRUKCE PIEZOELEKTRICKÉHO SNÍMAČE TLAKU

Piezoelektrické snímače tlaku pro použití k měření tlaků ve spalovacím prostoru pístového motoru jsou tvořeny několika vrstvami piezokeramiky. Ve snímači bývá obvykle zabudován impedanční převodník a kompenzační část pro odstranění vlivů vibrací Viz Obr.1.6.



Obr.1.6. řez piezoelektrickým senzorem tlaku [15]

Snímač je tvořen dvěmi piezoelektrickými elementy tvaru disku, které jsou spojeny elektricky paralelně a mechanicky sériově, díky toho se vzniklé náboje sčítají. Tyto elementy musí být v předepnutém stavu, aby byla závislost mezi změnou náboje a tlakem lineární. Tlak je přiváděn na střední část membrány, která zajišťuje počáteční předpětí a zároveň chrání piezoelektrické elementy před vysokými teplotami (až 2000°C), jelikož při teplotách nad 600°C krystal ztrácí piezoelektrické vlastnosti. [15]

### **3.2.4. VLASTNOSTI A CHARAKTERISTIKY PIEZOELEKTRICKÉHO SENZORU**

Výhodou piezoelektrických senzorů je jejich malá hmotnost a velikost. Díky svým vlastnostem jsou piezoelektrické senzory vhodné na měření dynamických tlakových průběhů ve spalovacím prostoru pístových motorů. Mezi jejich nevýhody jednoznačně patří teplotní závislost, nemožnost měřit statické tlaky, jelikož náboj vzniklý deformací rychle zaniká, a také obtížné zpracování signálu, jelikož je zapotřebí speciálních kabelů a zesilovače se vstupy o velkých odporech. Díky zástavby impedančního převodníku do obalu snímače tlaku odpadá nevýhoda potřeby speciálních kabelů, ale obvykle se sníží hranice pracovních teplot snímače. [15]

Snímače se vyrábějí v různých provedeních, jsou snímače chlazené, nechlazené, vyrábějí se také snímače které jsou součástí zapalovací svíčky, tím odpadá nutnost vrtání nového otvoru do hlavy válce. Viz obr.1.7 [16]



Obr.1.7. typy piezoelektrických senzorů tlaku (zleva – nechlazený, chlazený, součástí svíčky) [16]

### 3.3. POPIS MĚŘENÍ VYSOKOTLAKÉ INDIKACE

V následujícím bodu popisuji postup měření vysokotlaké indikace na motoru 1.2 HTP navrženého a používaného ve vozidlech značky Škoda Fabia II. generace. Tento motor se vyrábí ve dvou výkonnostních variantách a to 44 a 51 kW, pro měření jsem zvolil výkonnější variantu, typové označení motoru je BZG. Jedná se o zážehový tříválcový motor se čtyřmi ventily na válec, pohon vačkového hřídele a olejového čerpadla je realizován řetězovým převodem, motor je opatřen vyvažovacím hřídelem pro potlačení nežádoucích vibrací. Vstřikování je vícebodové nepřímé (MPI – Multi Point Injection) tzn. Pro každý válec jeden vstřikovač.

Tabulka technických dat motoru 1.2 HTP:

Výroba	01.07 - dodnes
Splňuje limity emisní normy	EURO-4
Celkový zdvihový objem [l]	1,198
počet válců	3
výkon kW při 1/min	51/5400
točivý moment Nm při 1/min	112/3000
Vrtání mm	76,5
Zdvih mm	86,9
Kompresní poměr	10,5:1
Délka ojnice [mm]	138
palivo - oktanové číslo	benzín - 95

Měření bylo provedeno pomocí zařízení AVL 619 indimetr viz.obr.1.8.

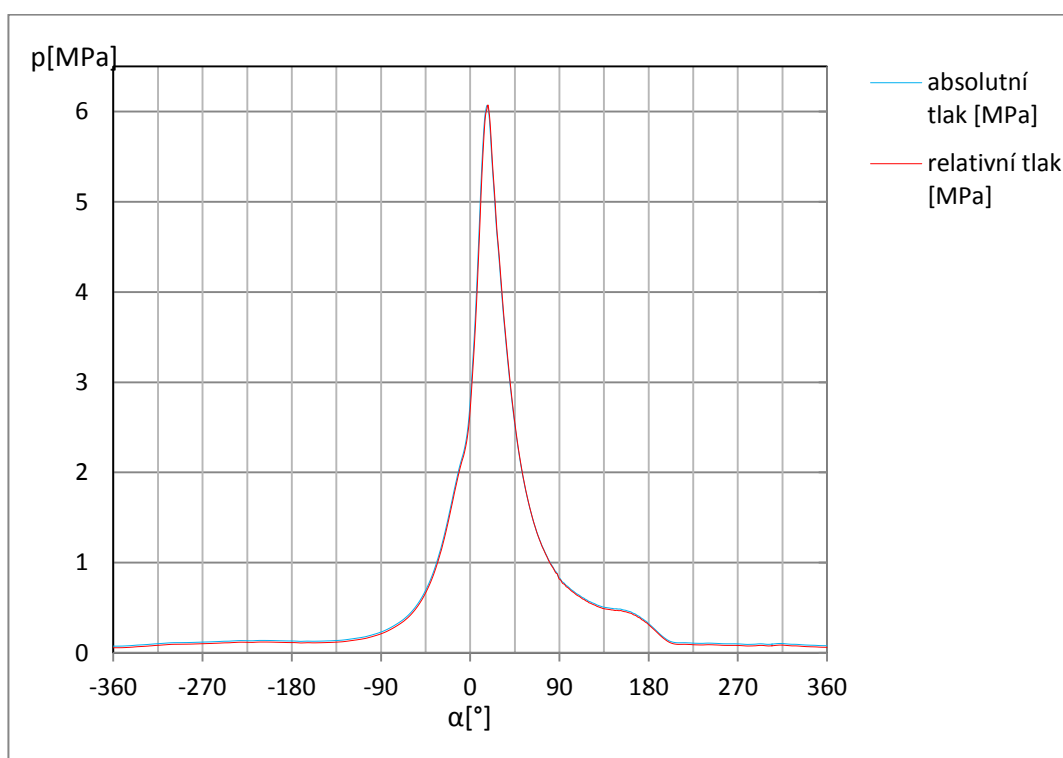


Obr.1.8. měřící zařízení indimetr [Škoda auto]

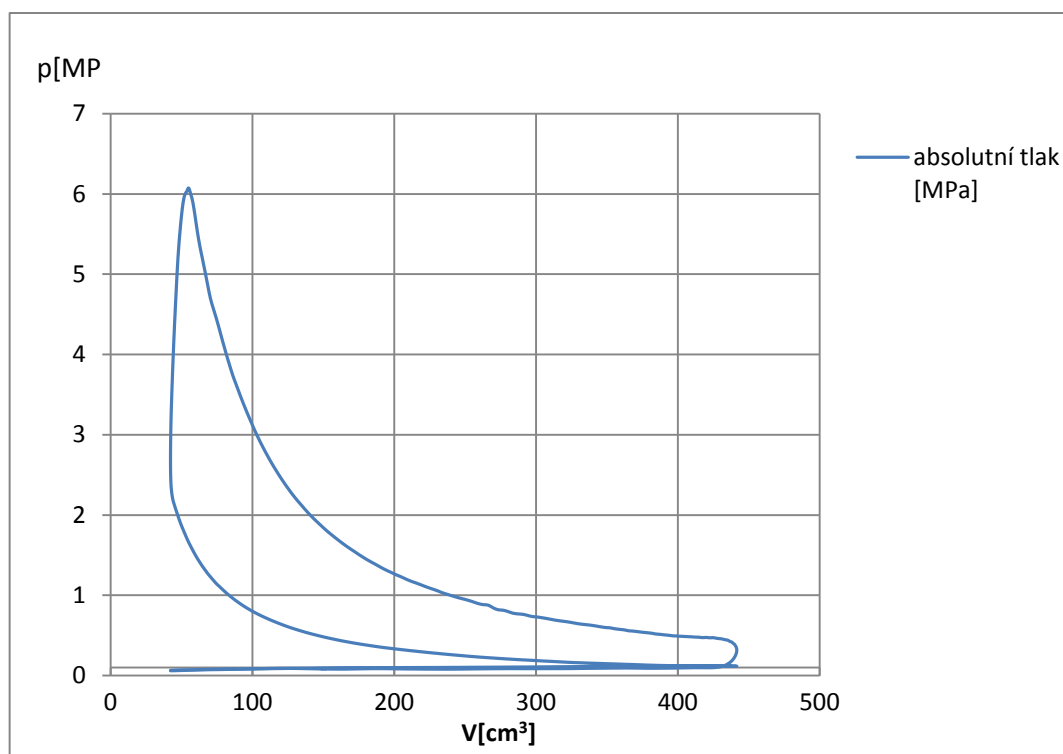


### 3.4. p- $\alpha$ DIAGRAM A p-V DIAGRAM

Z naměřených hodnot spalovacích tlaků jednoduše vytvoříme p- $\alpha$  diagram, který znázorňuje závislost indikovaného tlaku na úhlu natočení klikového hřídele. Při využití poznatků kinematiky klikového mechanismu a znalosti délky ojnice, vytvoříme indikátorový diagram znázorňující průběh tlaku v závislosti na okamžitém objemu spalovacího prostoru. p-V diagram dále slouží k porovnání skutečného teleného oběhu a idealizovaného tepelného oběhu tzv. Carnottova oběhu.



Obr.1.9. závislost tlaku na natočení klikového hřídele [autor]



Obr.1.10. závislost tlaku na okamžitém objemu [autor]

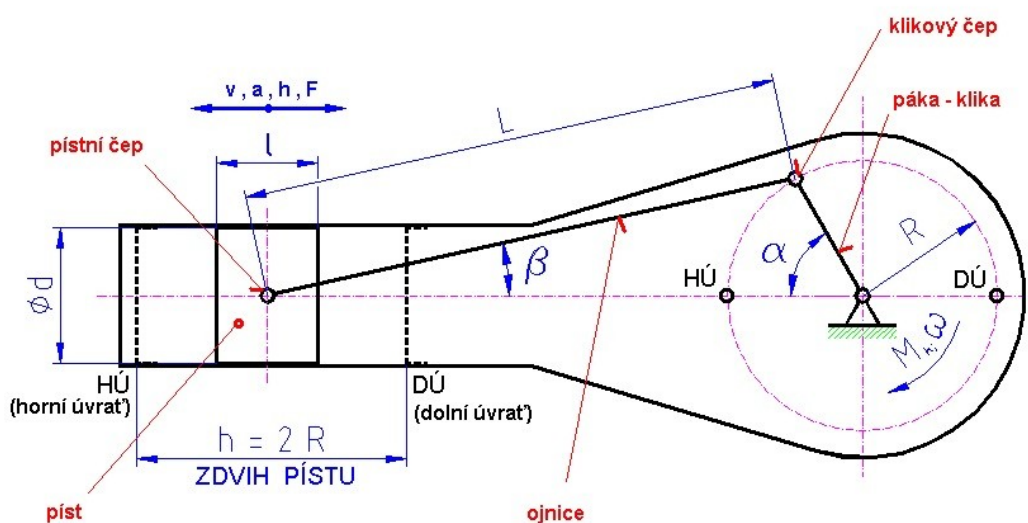
## 4. VÝPOČET INDIKOVANÝCH VELIČIN

V této kapitole popisují postup výpočtů veškerých indikovaných veličin z naměřených hodnot.

### 4.1. OKAMŽITÝ OBJEM – KINEMATIKA KLIKOVÉHO MECHANISMU

Díky naměřeným hodnotám úhlu natočení klikového hřídele jsme schopni díky znalostem kinematiky klikového mechanismu viz obr.1.11 vypočítat dráhu pístu  $X_p$  [m]

a dále pomocí jednoduchých vzorců vypočítat okamžitý objem spalovacího prostoru  $V_x$  [m<sup>3</sup>]



Obr.1.11. schéma klikového mechanismu [19]

Pro okamžitou polohu pístu platí vztah:

$$s(\alpha) = R + L - R \cdot \cos(\alpha) - L \cdot \cos(\beta) \quad (1.16)$$

Kde:  $s$  vzdálenost pístu od HÚ [m]

$R$  rameno kliky [m]

$L$  délka ojnice [m]

$\alpha$  úhel natočení kliky [°]

$\beta$  úhel odklonu ojnice [°]

Pomocí jednoduchých matematických úprav a zavedení klikového poměru  $\lambda$ , pro který platí:

$$\lambda = \frac{R}{L} \quad (1.17)$$

dostaneme vztah pro práhu pístu:

$$s(\alpha) = R \cdot [1 - \cos(\alpha)] + \frac{R}{\lambda} \cdot \left[ 1 - \left[ 1 - \frac{1}{2} \cdot \lambda^2 \cdot \sin^2(\alpha) \right] \right] \quad (1.18)$$

Abychom dále mohli určit závislost objemu na úhlu natočení klikového hřídele, musíme vypočítat kompresní objem  $V_k$  pomocí vzorce:

$$V(\alpha) = V_z(\alpha) + V_k \quad (1.19)$$

$$V_k = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L \cdot \left( \frac{1}{1 - \varepsilon} \right) \quad (1.20)$$

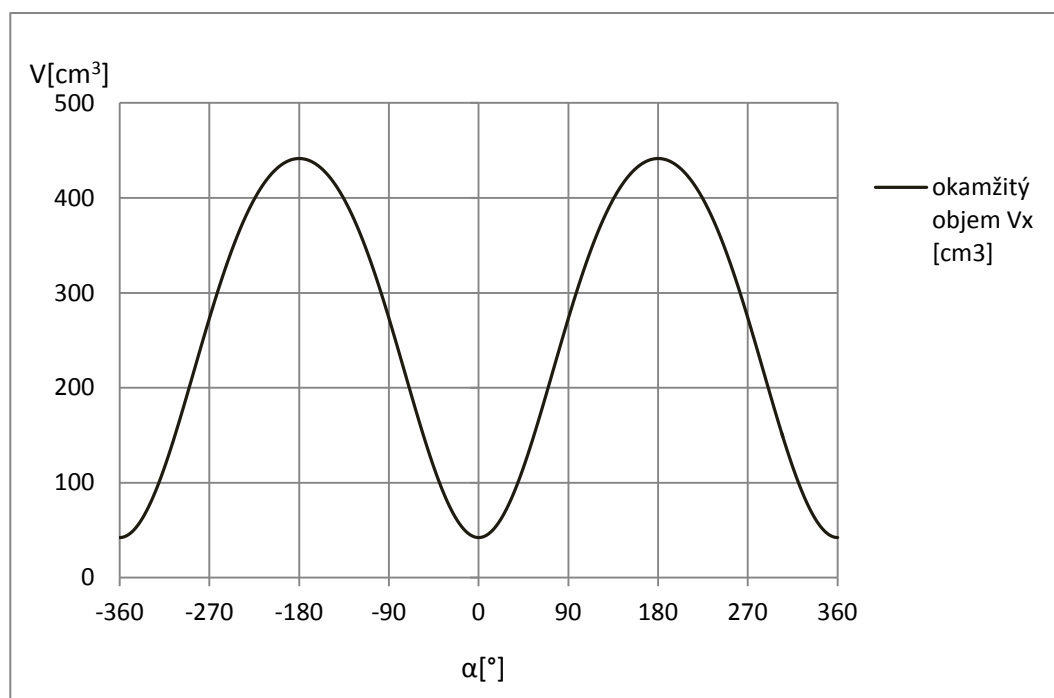
Kde:  $V_k$  kompresní objem [ $\text{m}^3$ ]  
 $V_z$  zdvihový objem válce [ $\text{m}^3$ ]  
 $d$  vrtání válce [m]  
 $\varepsilon$  kompresní poměr [-]

Okamžitý objem nad pístem  $V(\alpha)$  je součtem kompresního a zdvihového objemu.

$$V(\alpha) = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot X_p(\alpha) + V_k \quad (1.21)$$

Kde:  $V$  okamžitý objem nad pístem [ $\text{m}^3$ ]

Okamžitý objem nad pístem je zobrazen diagramem kde na vodorovnou osu vynášíme úhel natočení klikové hřídele [ $^\circ$ ] a na svislou osu okamžitý objem [ $\text{cm}^3$ ] viz Obr.1.12.



Obr.1.12. závislost okamžitého objemu na úhlu natočení klikového hřídele [autor]

## 4.2. KOREKCE TLAKU, VÝPOČET INDIKOVANÉ PRÁCE A STŘEDNÍHO INDIKOVANÉHO TLAKU (IMEP)

Abychom mohli vypočítat indikovanou práci, je třeba nejprve provést korekci tlaku z důvodu použití piezoelektrického senzoru, který měří tlak pouze relativní. K dalším výpočtům potřebujeme znát absolutní tlak, proto musíme provést korekci tlaku. Pro mé výpočty jsem zvolil polytropickou korekci tlaku, u které není třeba dalšího měření tlaků. Je založena na faktu, že během komprese (mezi  $-60^\circ$  a  $-120^\circ$  před HÚ) je přestup tepla do stěny válce konstantní a tak budu považovat polytropický exponent také za konstantní. [1,3,4,5]

Vycházím tedy ze vztahu:

$$p(\alpha_1) \cdot V(\alpha_1)^n = p(\alpha_2) \cdot V(\alpha_2)^n \quad (1.22)$$

Kde:  $p$  absolutná tlak [Pa]

$V$  okamžitý objem nad pístem [ $\text{m}^3$ ]

$\alpha_1 \alpha_2$  úhly natočen KH [ $^\circ$ ]

$n$  exponent polytropy [-]

Upravím rovnici:

$$p(\alpha_1) \times (V(\alpha_1)^n - V(\alpha_2)^n) = (p(\alpha_2) - p(\alpha_1)) \times V(\alpha_2)^n$$

$$p(\alpha_1) = \frac{(p(\alpha_2) - p(\alpha_1)) \cdot V(\alpha_2)^n}{V(\alpha_1)^n - V(\alpha_2)^n}$$

Rozdíl absolut. a rel. tlaků pro  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$  je stejný, pak můžeme napsat:

$$p(\alpha_2) - p(\alpha_1) = [p_{rel}(\alpha_2) + \Delta p_{kor}] - [p_{rel}(\alpha_1) + \Delta p_{kor}] = p_{rel}(\alpha_1) - p_{rel}(\alpha_2)$$

Upravím rovnici:

$$\Delta p_{kor} = P(\alpha_1) - p_{rel}(\alpha_1) = \frac{p_{rel}(\alpha_2) - p_{rel}(\alpha_1)}{\left[\frac{V(\alpha_1)}{V(\alpha_2)}\right]^n - 1} - p_{rel}(\alpha_1)$$

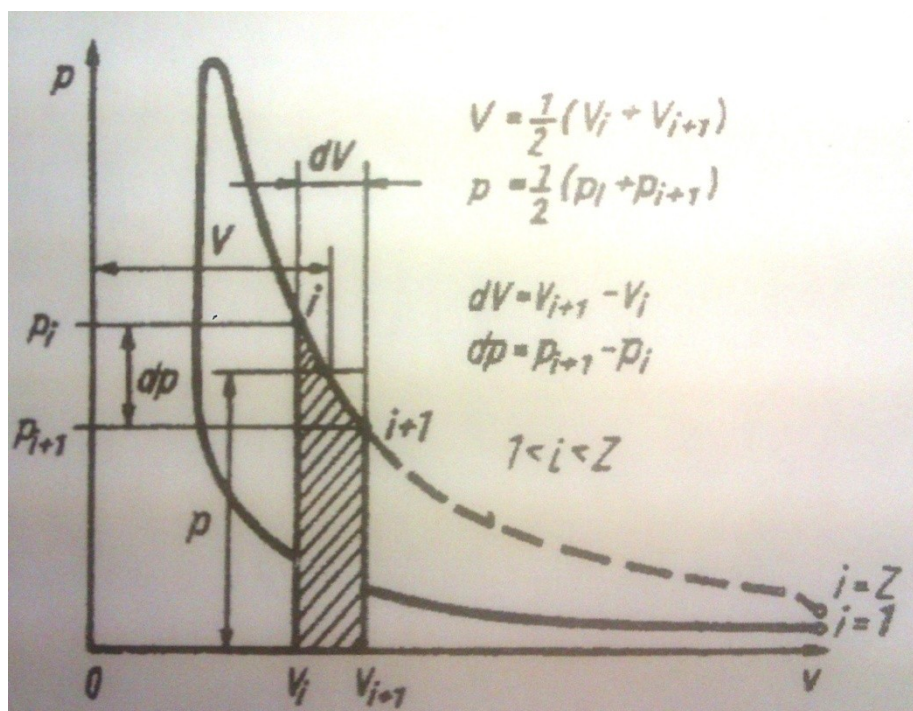
$$p_i = p_{rel_i} + \Delta p_{kor} \quad (1.23)$$

Kde:  $p_i$  absolutní tlak

$p_{rel_i}$  relativní tlak

$\Delta p_{kor}$  korekční tlak

Indikovanou práci dále vypočítáme z naměřených hodnot  $p_i$  a  $dV$  podle obr.1.13



Obr.1.13. výpočet indikované práce []

Indikovaná práce

$$W_i = \oint P_i dV$$

$$P_i = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (1.24)$$

$$dV = V_2 - V_1$$

$$\sum_{-360}^{360} W_i = W [J]$$

Střední indikovaný tlak vypočítáme podle vztahu:

$$P_{i_{stř}} = \frac{W}{V_{Z1}} = \frac{\oint P dV}{V_{Z1}} \quad (1.25)$$



### 4.3. VÝPOČET INDIKOVANÉHO VÝKONU

Indikovaný výkon

$$P_i = \frac{W \cdot n}{2} [W] \quad (1.26)$$

$$P_i \cdot i_v = P_{i_{celk}} \quad (1.27)$$

### 4.4. EFEKTIVNÍ UKAZATELE

Efektivní výkon

$$P_e = M_M \cdot \omega = M_M \cdot 2\pi n = \frac{M_M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (1.28)$$

Střední efektivní tlak  $P_{e_{stř}}$  vypočítáme ze vzthu:

$$P_e = \frac{i_v \times P_{e_{stř}} \times n \times V_{Z1} - dm^3}{30 \times \tau} \quad (1.29)$$

### 4.5. ZTRÁTOVÉ UKAZATELE

FMEP – třetí střední efektivní tlak

$$FMEP = IMEP - BMEP \quad (1.30)$$

Mechanická účinnost

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} \quad (1.31)$$

## **5. ZHODNOCENÍ A DOPORUČENÍ**

Vzhledem k rozvíjející se poptávce po úspornějších spalovacích motorech je třeba podrobně znát veškeré děje podílející se na přeměně chemické energie na mechanickou. Měření vysokotlakých indikací v kombinaci s přímým měřením výkonu na motorové brzdě je efektivní způsob pro vývoj nového spalovacího motoru. Pomocí vytvořené šablony je možno jednoduše zhodnotit naměřené hodnoty. Výsledek mé bakalářské práce přispívá ke zjednodušení výpočtů indikovaných a efektivních ukazatelů, a mohla by být použita k vypracování podrobnější diplomové práce.

## 6.ZÁVĚR

Cílem mé bakalářské práce bylo vytvoření metodiky vyhodnocování dat naměřené vysokotlaké indikace čtyřdobého, pístového spalovacího motoru včetně vyhodnocení výsledků a následného porovnání hodnot naměřených na motorové brzdě s hodnotami indikovaných veličin.

V úvodu je uveden popis funkce čtyřdobého spalovacího motoru, jeho charakteristiky a metody měření výkonu.

V dalším bodě rozebírám měření vysokotlakých a nízkotlakých indikací pístového spalovacího motoru, výběr vhodných snímačů pro sběr dat vysokotlaké indikace.

Dále byla vytvořena šablona pro výpočet indikovaných veličin (indikovaná práce, indikovaný výkon, střední indikovaný tlak), efektivních ukazatelů (efektivní výkon, střídání efektivní tlak), ztrátových ukazatelů (třecí střední efektivní tlak a mechanická účinnost). Pomocí této šablony byly vytvořeny grafy a diagramy.

Získané výsledky mohou být použity pro další zpracování a analýzu spalování pístových spalovacích motorů.

## **SEZNAM PŘÍLOH**

- 1) Výpočtová šablona v aplikaci excel 2007
- 2) CD-ROM s bakalářskou prací v elektronické podobě
- 3) Vstupní data naměřené vysokotlaké indikace

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

### a) knižní zdroje

- [1] Vlk, František: *Vozidlové spalovací motory*. Brno, 2003. 1. vyd. ( 580 str. ), ISBN 80-238-8756-4
- [2] Jan, Zdeněk; Ždánský Bronislav: *Automobily ( 3 ), Motory*. Brno 2008. 5. vyd.( 179 str. ), ISBN 978-80-87143-06-3
- [3] MACEK, Jan. *Spalovací motory I*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2007, 260 s. ISBN 978-80-01-03618-1.
- [4] A.J. MARTYR, A.J.M. *Engine testing theory and practice*. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, 260 s. ISBN 978-075-0684-392.
- [5] PULKRABEK, Willard W. *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, c2004, xxiii, 478 p. ISBN 01-314-0570-5.
- [6] MATĚJKA, Rostislav. *Vozidla silniční dopravy I*. 2. vydání, ALFA, Bratislava, 1990. ISBN 80-05-00392-7.
- [7] MATĚJKA, Rostislav. *Vozidla silniční dopravy II*, Alfa Bratislava, 1994, 242 s. ISBN 80-7100-074-4
- [8] VLK, František. *Diagnostika motorových vozidel*. Brno: Prof.Ing.František Vlk,DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006, 444 s. ISBN 80-239-7064-X.
- [9] VLK, František. *Motorová vozidla I: Určeno pro posl. fak. strojní*. 1. vyd. Praha: MON, 1989, 224 s. Učební texty vys. škol. ISBN 80-214-0038-2.
- [10] KYSELA, Ladislav a Jiří TOMČALA. *Spalovací motory I*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Strojní fakulta, 2003, 97 s. ISBN 80-248-0435-2.
- [11] KYSELA, Ladislav a Jiří TOMČALA. *Spalovací motory II*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2004, 70 s. ISBN 80-248-0628-2.

[12] PETŽÍLKA A KOL., Piezoelektrina a její technické použití, ČSAV – Československá akademie věd, Praha 1960, (str. 28-34), DT-537.228.1

[15] Karel Kadlec – Snímače tlaku- snímače a měřicí technika 2007

#### **b) internetové zdroje**

[13][http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/experiment\\_metody/In-TECH2\\_mereni\\_tlaku.pdf](http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/experiment_metody/In-TECH2_mereni_tlaku.pdf)

[14]<http://www.vinca.estranky.cz/clanky/motory.html>

[16]<http://www.kistler.com/cz/en/product/pressure/6056A31U20>

[17]<http://www.autoznalosti.cz/index.php/motor/36-ventilove-rozvody-zakladni-rozdeleni.html>

[18] [http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/tlak\\_tlakomery\\_elektricke.htm](http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/tlak_tlakomery_elektricke.htm)

[19][http://www.spszr.cz/~blazicek/Projekt/klik\\_mech/klikvystr\\_mech.htm](http://www.spszr.cz/~blazicek/Projekt/klik_mech/klikvystr_mech.htm)